

Estudo da Utilização de Cartas de Controle e da Capabilidade de Processo no Monitoramento e Ajuste dos Intervalos de Calibração de um Transdutor de Torque

Mateus de Melo Silva Freitas ¹  orcid.org/0000-0003-4280-4229

José Eduardo Ferreira de Oliveira ¹  orcid.org/0000-0001-7423-2590

Eduardo José Alécio de Oliveira ¹  orcid.org/0000-0003-3081-3865

Nelson Gonçalves da Silva ¹  orcid.org/0000-0002-0437-2819

Carlos Augusto do Nascimento Oliveira ²  orcid.org/0000-0003-1122-1610

Rogério Pontes de Araújo ³  orcid.org/0000-0001-9045-6762

¹ Instituto Federal de Pernambuco, Recife, Brasil,

² Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil,

³ Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

E-mail do autor principal: José Eduardo Ferreira de Oliveira joseferreira@recife.ifpe.edu.br

Resumo

Na atualidade, um dos grandes desafios enfrentados por laboratórios de calibração e ensaios, diz respeito à determinação de um intervalo de calibração para os seus padrões e equipamentos auxiliares, de modo a não serem tão curtos a ponto de impactarem expressivamente nos custos do laboratório e, conseqüentemente, na viabilidade econômica dos serviços prestados, nem demasiadamente grandes a ponto de interferirem na confiabilidade metrológica dos resultados gerados. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo experimental realizado em uma célula de torque com faixa nominal de 100 N.m, com o objetivo de se verificar a estabilidade e para que seja possível ajustar o seu intervalo de calibração. Para tal, foram utilizadas cartas de controle da amplitude, além do coeficiente de capacidade C_g. Os resultados obtidos possibilitaram não apenas o acompanhamento do comportamento das cartas de controle da amplitude, como aumento do intervalo de calibração e indicação de possíveis problemas ocorridos entre calibrações, podendo-se concluir que a metodologia adotada auxilia na determinação do intervalo de calibrações.

Palavras-Chave: Ajuste; Carta de controle; Capabilidade; Célula de torque; Intervalo de calibração.

Abstract

Currently, one of the great challenges faced by calibration and testing laboratories, concerns the determination of a calibration interval for their standards and auxiliary equipment, so as not to be so short as to have a significant impact on laboratory costs and, consequently, in the economic viability of the services provided, not too large to the point of interfering in the metrological reliability of the results generated. The objective of this work is to present an experimental study carried out in a torque cell with a nominal range of 100 N.m, with the objective of verifying the stability and so that it is possible to adjust its calibration interval. For this, amplitude control charts were used, in addition to the capability coefficient C_g. The results obtained

made it possible not only to monitor the behavior of the amplitude control charts, but also to increase the calibration interval and indicate possible problems that occurred between calibrations, and it can be concluded that the adopted methodology assists in determining the calibration interval.

Key-words: Adjustment; Control chart; Capability; Torque cell; Calibration interval.

1 Introdução

Atualmente, os laboratórios de calibração e ensaios se deparam com um constante desafio no que diz respeito à determinação de um intervalo de calibração. A determinação da periodicidade entre calibrações deve ser estabelecida de forma a reduzir os custos envolvidos, atendendo a viabilidade econômica dos serviços prestados, com garantia da confiabilidade dos padrões e equipamentos auxiliares, para que os resultados gerados sejam coerentes [1-8].

Segundo OLIVEIRA (2008), a estabilidade de um instrumento de medição, ou sistema de medição, ou material de referência ou uma medida materializada é a capacidade do mesmo manter perceptivelmente inalteradas suas características metrológicas.

Os responsáveis pela calibração de equipamentos se deparam constantemente com o desafio de minimizar custos e estabelecer conformidade com a ISO 9000 [9]. Tal fato é observado ao se abordar as normas NBR ISO 9001 (2015) e NBR ISO/IEC 17025 (2006) [10,11]. À medida em que se amplia o custo como resultado de uma maior frequência de calibrações, haverá uma diminuição do risco de se ter um equipamento de medição não conforme e, em contra partida, há a possibilidade de tornar esta prática financeiramente inviável.

A estabilidade, juntamente com o propósito e uso de um equipamento de medição são a base para a determinação do intervalo de calibração que é definido como o período entre uma calibração e outra, sucessivamente. O eficiente estabelecimento desse intervalo representa uma ação de fundamental importância para o efetivo controle metrológico, porém, não é uma tarefa fácil, pois depende de uma série de fatores, onde os mais importantes são (NBR 10012-1, 1993) [12-16]:

- O tipo de equipamento;
- As recomendações do fabricante do equipamento;
- Os dados gerados através do estabelecimento do histórico de calibrações;
- A frequência de uso;

- A severidade de uso;
- A tendência ao desgaste de componentes que exercem influência na medição;
- As verificações intermediárias realizadas com outros equipamentos de medição, principalmente com outros padrões;
- O grau de confiabilidade dos laboratórios executantes da calibração;
- As condições ambientais as quais os equipamentos estarão sujeitos (temperatura, umidade, vibração, etc.);
- A exatidão, repetibilidade e incerteza de medição pretendidas e
- Os custos inerentes à calibração.

Existem várias técnicas para a determinação dos intervalos de calibração, porém, nenhuma delas é estabelecida como padrão, sendo sua adoção dependente do tratamento desejado aos equipamentos de medição. Dentro desse contexto, os métodos usualmente empregados são:

- Ajuste automático ou escalonado;
- Gráfico de controle;
- Histórico;
- Tempo de uso e
- Ensaio em serviço ou método da caixa preta.

Um processo sob controle estatístico significa que a sua variabilidade apenas acontece por causas aleatórias e que as variáveis analisadas estão dentro de limites considerados como sendo de controle com o passar do tempo. A elaboração de gráficos de controle para variáveis se dá com o propósito de se monitorar, concomitantemente, o comportamento da média amostral e da variabilidade para uma grandeza específica em um determinado processo [23,24].

Os métodos empregados em laboratórios para a determinação do intervalo de calibração dos seus padrões e equipamentos auxiliares são métodos qualitativos que se baseiam na experiência adquirida e na tentativa e erro.

Diante deste contexto, o presente trabalho de pesquisa apresenta um estudo através da utilização de cartas de controle, verificando a estabilidade dos pontos medidos em relação aos limites de controle, a fim de estabelecer o intervalo de calibração em uma célula de torque, e desta forma contribuir com empresas e laboratórios no estabelecimento da frequência de calibrações dos seus sistemas e instrumentos de medição, pois a metodologia aqui aplicada, estende-se aos demais setores e equipamentos, tornando-se uma ferramenta simples e indispensável para usuários que desejem agregar confiabilidade metrológica com redução de custos.

2 Materiais e Métodos

Todo o procedimento experimental foi realizado nos laboratórios de metrologia mecânica do Instituto Tecnológico de Pernambuco – ITEP e do Instituto Federal de Pernambuco – IFPE – Campus Recife, onde os estudos foram realizados em uma célula de torque digital, disposta em uma bancada, conforme Figura 1.



Figura 1: Bancada de torque utilizada nos experimentos. Fonte: O autor (2018).

A referida célula de torque possui as seguintes características:

- Indicação digital;
- Sentido horário e anti-horário;
- Faixa nominal 0 – 100 N.m;
- Menor divisão 0,1 N.m.

Para acompanhamento das variações da célula de torque foi utilizado um torquímetro com as seguintes características:

- Torquímetro analógico (horário e anti-horário);
- Faixa nominal 0 – 16 kgf.m;

- Menor divisão 0,5 kgf.m.

É importante salientar que este torquímetro tem utilização única e exclusiva para verificações intermediárias da célula de torque, sendo o mesmo devidamente armazenado e manuseado por técnicos capacitados do laboratório. Por sua vez, os resultados das calibrações desta célula de torque, presentes nos quatro últimos certificados de calibração, são apresentados na Tabelas 1.

Tabela 1: Dados obtidos das quatro últimas calibrações da célula de torque de 100 N.m.

Ano	Incerteza de Medição Herdada (U) N.m	Erro de Indicação (EI) %	Tendência Máxima (Td _{máx}) N.m	Fator de Abrangência (k)
1	0,06	0,17	0,10	2
2	0,06	0,25	0,15	2
3	0,06	0,43	0,26	2
4	0,06	0,43	0,40	2

Para realização de análise da estabilidade da célula de torque, foram considerados os pontos 20 N.m, 40 N.m, 60 N.m e 80 N.m, com o intuito de explorar ao máximo a faixa nominal do sistema de medição, sendo o valor de fundo de escala preservado para não correr o risco de aplicar sobrecarga no sistema. Em cada ponto citado foram realizadas quatro medições, com um intervalo de 30 minutos entre uma medição e outra, visando a estabilização da célula de torque, totalizando vinte amostras, sendo tomada uma única amostra por semana. A Figura 2 apresenta um esquema contendo a sequência de medições realizadas por semana para obtenção das amostras.

Estudo da Utilização de Cartas de Controle e da Capabilidade de Processo no Monitoramento e Ajuste dos Intervalos de Calibração de um Transdutor de Torque

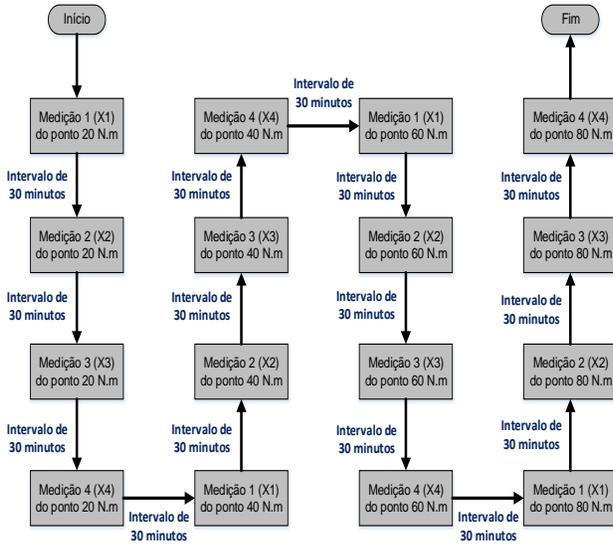


Figura 2: Sequência de medições realizadas por semana para obtenção das amostras.

Fonte: O autor (2018).

Assim, o tamanho da amostra n é igual a 4, a fim de alinhar confiabilidade com custo e tempo, e o número de amostras m vale 20, uma vez que a sequência de medições apresentada na Figura 2 foi realizada num período de vinte semanas consecutivas. Para o caso de $n < 10$, deve-se utilizar como carta de controle para variabilidade, a carta da amplitude ao invés da carta do desvio padrão, pois no dia a dia da indústria é difícil realizar estudos acerca da estabilidade de um processo a longo prazo, e neste caso realiza-se uma análise com base na amplitude dos resultados, adotando os mesmos critérios de estabilidade adotados para ensaios de longo prazo [23,24]. Assim, para cada um dos quatro pontos verificados da célula de torque foi obtida uma carta de controle da amplitude.

Para a elaboração da carta de controle, a linha central é dada pela amplitude média de cada amostra \bar{R} , o limite superior de controle (LSC_R) é obtido através da Eq. (1) e o limite inferior de controle (LIC_R) obtido por meio da Eq. (2) [6,7,23].

$$LSC_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (1)$$

Onde:

D_4 = fator estatístico, dependente do número de pontos da amostra.

$$LIC_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (2)$$

Onde:

D_3 = fator estatístico, dependente do número de pontos da amostra.

A Tabela 2 apresenta os fatores estatísticos para a determinação das cartas de controle da média (\bar{X}) e da amplitude (\bar{R}) para um número de amostra n igual a 20 [23].

Tabela 2: Fatores estatísticos

Número de pontos da amostra (n)	Fatores		
	A_2	D_3	D_4
4	0,73	0,0	2,28

O coeficiente de capacidade C_g foi utilizado neste trabalho para acompanhar a estabilidade da célula de torque, onde convencionou-se que um processo estará sob controle estatístico quando $C_g > 1$ [6,7,23]. O seu valor é dado pela Eq. (3), onde T é a tolerância admissível para o sistema de medição, w é o número de desvios padrão ligado à dispersão e s é o desvio padrão amostral.

$$C_g = \frac{0,2T}{w \cdot s} \quad (3)$$

Para o cálculo de C_g , a variável w apresenta valores 4 e 6 [17-21]. Neste trabalho adotou-se $w = 4$ e a tolerância, T , considerada foi igual a 8 N.m, o que representa dez vezes a incerteza máxima admissível do padrão, uma vez que a regra de ouro da metrologia estabelece que a incerteza herdada máxima admissível adotada pelo laboratório poderá variar entre 1/3 e 1/10 da tolerância admissível, sendo esta incerteza igual 0,8 N.m [3,23].

Como o objetivo deste trabalho é determinar o intervalo de calibração, foi realizado o monitoramento da estabilidade de uma célula de torque, onde utilizou-se a carta de controle das amplitudes, cuja função é analisar a repetibilidade das amostras coletadas, ou seja, verificar se o sistema de medição está sob controle estatístico.

As cartas geradas a partir destas vinte amostras serviram como carta de referência para o modelo estudado. Em seguida, foram realizadas coletas de apenas uma amostra de cada ponto em estudo, e posterior comparação com a carta de controle de referência. Caso o valor do ponto analisado se apresente fora dos limites de controle, uma nova coleta era realizada, tomando-se o cuidado de verificar os possíveis aspectos apresentados no

Diagrama de Ishikawa da Figura 3, os quais são apresentados alguns causadores de influência nos resultados de uma amostra acerca dos limites de controle.

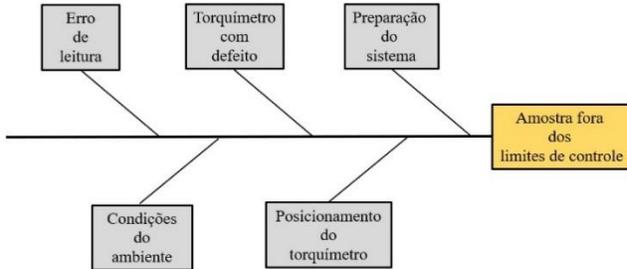


Figura 3: Possíveis causadores de influência no resultado de uma amostra acerca dos limites de controle. Fonte: O autor (2019).

Caso o ponto escolhido ainda se apresentasse fora dos limites de controle, a célula de torque seria retirada de serviço para manutenção e recalibração. Tal procedimento vale para qualquer um dos pontos analisados na faixa nominal do sistema de medição. A Figura 4 apresenta um fluxograma contendo a sequência experimental apresentada no presente trabalho.

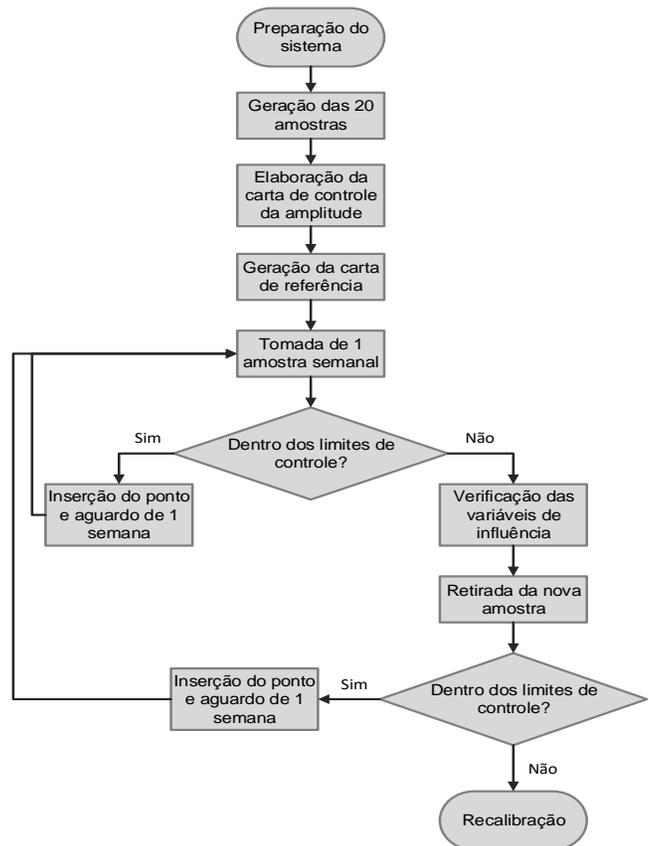


Figura 4: Fluxograma da metodologia proposta. Fonte: O autor (2019).

3 Resultados e Discussão

As Figuras 5, 6, 7 e 8 apresentam gráficos contendo os valores medidos (X_1 , X_2 , X_3 e X_4) em N.m, nos respectivos pontos 20 N.m, 40 N.m, 60 N.m e 80 N.m, num período de vinte semanas. Os valores apresentados já se encontram com as respectivas correções dos erros sistemáticos. Por outro lado, todos os pontos de cada amostra foram testados no *software ANALYSIS* com o intuito de se verificar possíveis *outliers*, tomando os testes de *Dixon*, *Grubbs* e *Chauvenet* [22].

Estudo da Utilização de Cartas de Controle e da Capabilidade de Processo no Monitoramento e Ajuste dos Intervalos de Calibração de um Transdutor de Torque

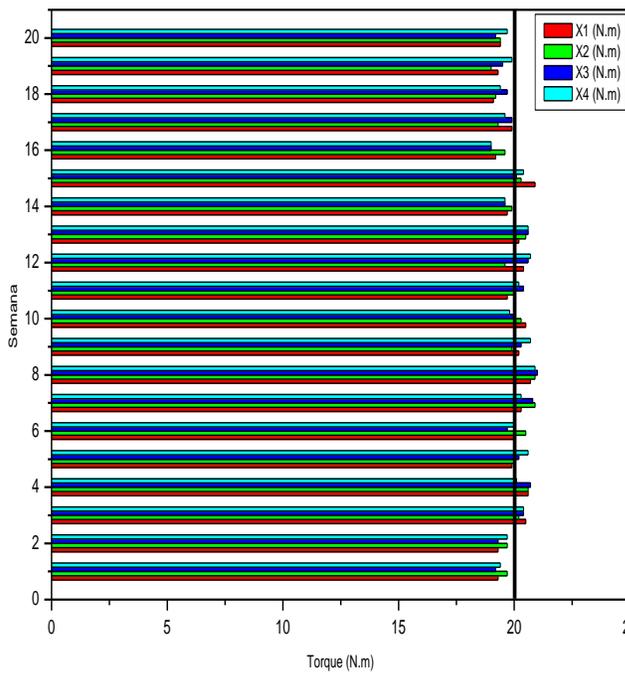


Figura 5: Gráfico de medições X1, X2, X3 e X4 para o ponto 20 N.m ao longo de vinte dias
Fonte: O autor (2019)

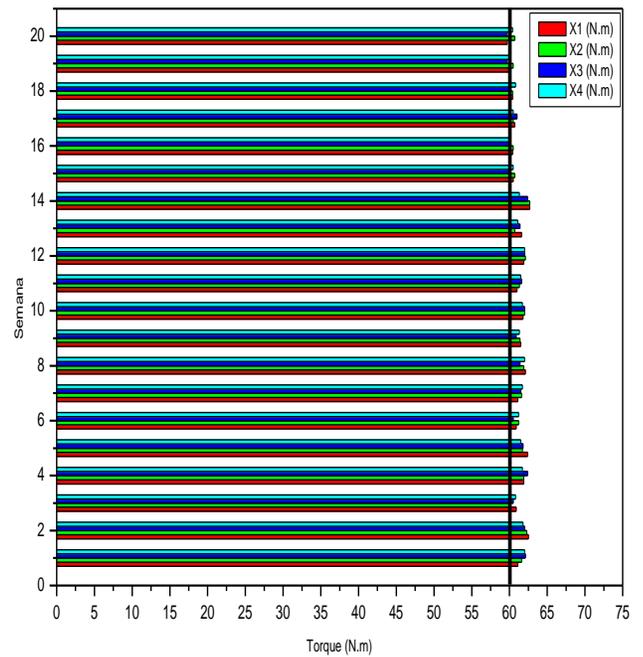


Figura 7: Gráfico de medições X1, X2, X3 e X4 para o ponto 60 N.m ao longo de vinte dias
Fonte: O autor (2019)

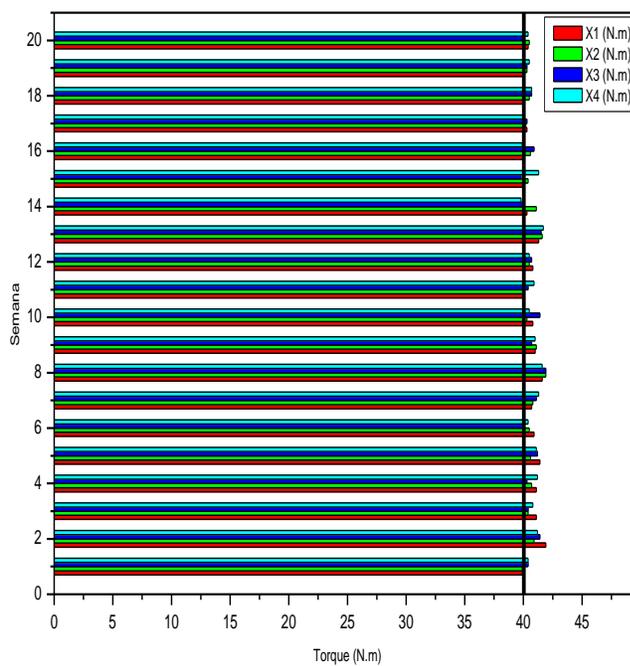


Figura 6: Gráfico de medições X1, X2, X3 e X4 para o ponto 40 N.m ao longo de vinte dias
Fonte: O autor (2019)

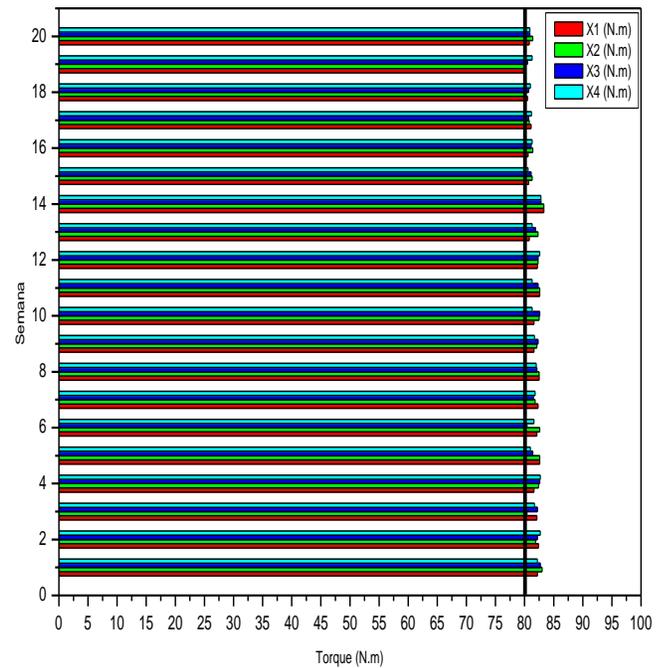


Figura 8: Gráfico de medições X1, X2, X3 e X4 para o ponto 80 N.m ao longo de vinte dias
Fonte: O autor (2019)

Com a obtenção dos valores de medição X1, X2, X3 e X4, dos respectivos pontos 20 N.m, 40 N.m, 60 N.m e 80 N.m, pode-se observar a variabilidade dos resultados de medição devido aos fatores causadores de influência que são apresentados na Figura 3. Utilizando as equações (1), (2) e (3), foi possível obter as correspondentes cartas de controle, bem como os coeficientes de capacidade Cg.

As Figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam as cartas de controle da amplitude para os pontos de 20, 40, 60 e 80 N.m. As linhas verde, vermelha e azul, representam o limite superior de controle (LSC_R), a amplitude média (\bar{R}) e o limite inferior de controle (LIC_R), respectivamente.

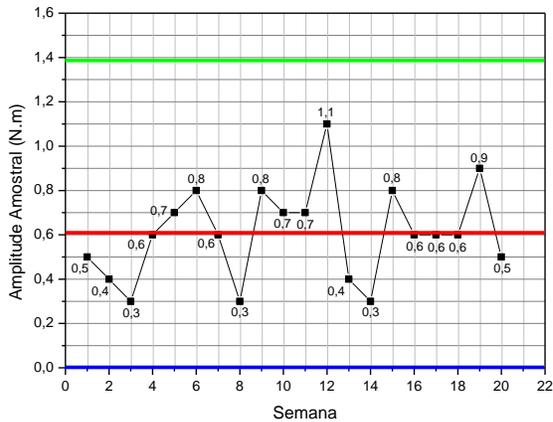


Figura 9: Carta de controle da amplitude para o ponto de 20 N.m.
Fonte: O autor (2019).

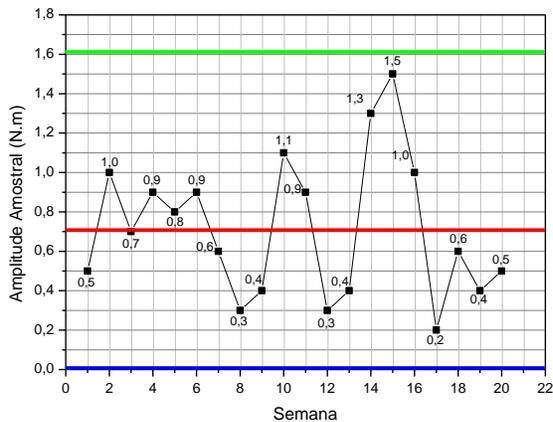


Figura 10: Carta de controle da amplitude para o ponto de 40 N.m.

Fonte: O autor (2019).

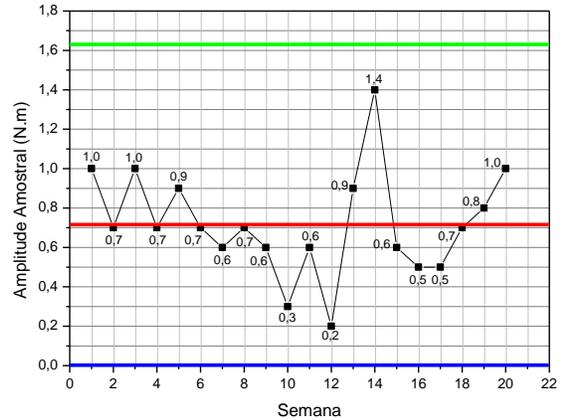


Figura 11: Carta de controle da amplitude para o ponto de 60 N.m.

Fonte: O autor (2019).

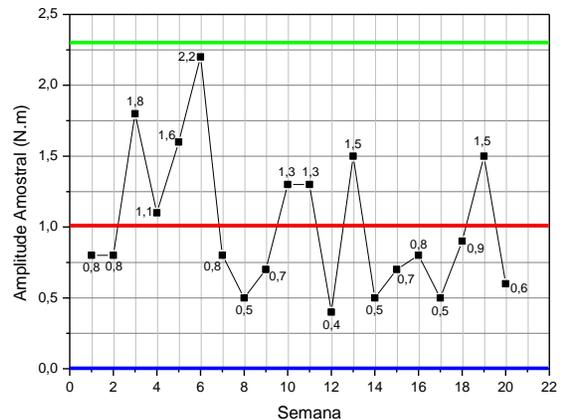


Figura 12: Carta de controle da amplitude para o ponto de 80 N.m.

Fonte: O autor (2019).

Analisando as cartas de controle apresentadas pelas Figuras 9, 10, 11 e 12, observa-se que todas as variações estiveram contidas dentro dos limites de controle, ou seja, não foram obtidos pontos fora de especificação.

A Tabela 3 apresenta os valores de Cg para os pontos analisados, considerando-se as 20 amostras.

Tabela 3: Dados referentes ao coeficiente de capacidade Cg.

Pontos	C_g
20 N.m	1,46
40 N.m	1,24
60 N.m	1,23
80 N.m	0,85

O valor ideal para o C_g é acima de 1,33, porém, valores entre 1 e 1,33 poderão ser aceitos para o sistema de medição ser considerado estável, mas despertando o alerta. Neste caso, ao invés de se coletar 1 amostra semanal, deverão ser coletadas 2 amostras, sendo também montadas as cartas de amplitude para fins de comparação.

Pode-se verificar, através da análise da Tabela 6, que o ponto de 80 N.m apresentou valor de C_g igual a 0,85. Como o valor foi inferior a 1, após avaliação das possíveis fontes causadoras de desvios e respeitando a sequência apresentada na Figura 4, foi retirada uma nova amostra, cujos valores estão mostrados na Tabela 4. O valor de C_g neste caso foi 1,14, e como foi superior a 1, torna-se aceitável. Ainda pode-se destacar que a variabilidade entre os valores de C_g das amostras no ponto 80 N.m, provavelmente está relacionada às fontes causadoras de influência no resultado de uma medição, apresentadas anteriormente na Figura 3.

Tabela 4: Dados referentes à amostra adicional para o ponto 80 N.m.

Ponto (N.m)	X_1 (N.m)	X_2 (N.m)	X_3 (N.m)	X_4 (N.m)	C_g
80	80,6	79,9	80,6	80,6	1,14

A Figura 13 apresenta um gráfico contendo o valor de C_g de cada ponto medido. Neste gráfico, a linha azul representa o valor de referência de C_g igual a 1.

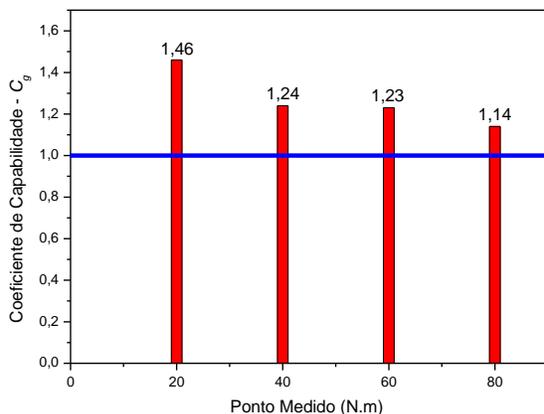


Figura 13: Gráfico contendo os valores do coeficiente de capacidade de cada ponto medido.
Fonte: O autor (2019).

Analisando o gráfico acima, constata-se que os valores de C_g se mantiveram acima 1, indicando estabilidade do processo e configurando-se em controle estatístico.

Também pode ser constatado que os valores obtidos nas cartas de controle se mantiveram entre os limites superior e inferior de controle, indicando uma convergência entre o estudo dos coeficientes de capacidade e das cartas de controle, corroborando para a confiabilidade do trabalho de pesquisa e atendendo ao fluxograma apresentado na Figura 4.

Devido aos pontos medidos terem se encontrado dentro dos limites de controle, pode-se realizar um novo acompanhamento por mais seis meses, o que resulta num maior intervalo de calibração, uma vez que a última calibração datou em um ano antes da aplicação do estudo. Desta forma, obtém-se menor custo com calibração e maior disponibilidade do equipamento.

4 Conclusão

A variabilidade dos resultados de medição apresentados nas Figuras 5, 6, 7 e 8, comprova a vulnerabilidade de sistemas e instrumentos de medição quanto a fatores causadores de influência nos resultados de uma amostra, apresentados na Figura 3, mostrando que um processo poderá estar sendo avaliado de forma incorreta caso não os considere.

Verifica-se coerência entre os dados apresentados nas cartas de controle e os coeficientes de capacidade, justificando a aplicabilidade do método proposto para determinação de intervalos de calibração.

Através das verificações realizadas semanalmente, foi possível constatar que a célula de torque apresentou variações dentro dos limites de controle, assim como os coeficientes de capacidade obtidos ficaram entre os valores esperados, contudo se faz necessário um período maior de avaliação caso se deseje acompanhar e investigar possíveis tendências e oscilações do sistema.

Com o presente estudo, foi possível aumentar o intervalo de calibração, uma vez que no período de verificações o sistema apresentou-se conforme no que diz respeito aos limites de controle.

A metodologia proposta, mostrou-se confiável, e pode ser utilizada para a determinação de intervalos de calibração de qualquer sistema ou instrumento de medição aplicados nas mais diversas áreas do conhecimento.

5 Referências

- [1] LIRA, F. A. **Metrologia – Conceitos e práticas de instrumentação**. Editora Saraiva Ebooks, 2019.
- [2] FELIX, RODRIGO P. B. COSTA; BERNARDES, AMÉRICO. **Metrologia – Fundamentos**. Vol. 1, Editora BRASPORT, 2017.
- [3] ABACKERLI, ÁLVARO J.; PEREIRA, PAULO H.; OLIVEIRA, MARIA C.; MIGUEL, PAULO A. CAUCHICK. **Metrologia para a qualidade**. 1ª Edição, Editora LTC, 2016.
- [4] SILVA NETO, JOÃO CIRILO DA. **Metrologia e controle dimensional**. 2ª Edição, Editora LTC, 2018.
- [5] MENDES, ALEXANDRE; ROSÁRIO, PEDRO PAULO NOVELLINO DO. **Metrologia e incerteza de medição: Conceitos e aplicações**. 1ª Edição, Editora LTC, 2019.
- [6] COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L.C.R. **Controle estatístico de qualidade**. 1ª edição, Editora ATLAS, 2005.
- [7] MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico de qualidade**. 7ª edição, Editora LTC, 2017.
- [8] WYATT, D.W. & CASTRUP, H.T. **Managing Calibration Intervals**. Presented at the NCSL 1991 Annual Workshop & Symposium, Albuquerque, August 1991.
- [9] ABNT NBR ISO 9001 - **Sistema de gestão da qualidade - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, 2015.
- [10] ABNT NBR ISO/IEC 17025 – **Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração**. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, 2006.
- [11] BARE, A. **Simplified Calibration Interval Analysis**. NCSL International Workshop and Symposium, 2006.
- [12] ISO/ABNT NBR 10012-1. **Requisitos de garantia da qualidade para equipamentos de medição – Parte 1: Sistema de comprovação metrológica para equipamentos de medição**. ABNT, Rio de Janeiro, 1993.
- [13] ILAG. **G 24 - Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments. OIML D 10**. International Organization of Legal Metrology, 2007.
- [14] NCSL. **Recommended Practice RP-1, Establishment and Adjustment of Calibration Intervals**. 15th, November, 1989.
- [15] CASTRUP, H. & JOHNSON, K.M. **Techniques for Optimizing Calibration Intervals**. Presented at the ASNE Test & Calibration Symposium, Arlington, December 1994.
- [16] OLIVEIRA, J.E.F. de. **Fundamentos básicos da qualidade aplicados ao setor industrial e de serviços**. Editora Livro Rápido, 1ª Edição, Olinda, 2016.
- [17] TUOMINEN, V.; NIINI, I. **Verification of the accuracy of a real-time optical 3D-measuring system on production line**. The international archives of the photogrammetry, remotes ensign and spatial information sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, 2008.
- [18] BUJARA, M.; IMKAMP, D. **Acceleration of quality control on coordinate measuring machines with “navigator scanning”**. Annals of the Oradea University. Fascicle of management and technological engineering, volume VI (XVI), 2007.

[19] JANKOVYCH, R.; BEER, S. **T-72 tank barrel wear**. International journal of mechanics, issue, 4, volume 5, 2011.

[20] RAHMATI, S.H.A.; AMALNICK, M.S. **Fuzzy gauge capability (C_g and C_{gk}) through buckley approach**. International journal of mechanical, aerospace, industrial, mechatronic and manufacturing engineering, vol. 9, n. 8, 2015.

[21] POLÁK, P.; DRLICKA, R.; ZKINANSKY, J. **Capability assessment of measuring equipment using statistic method**. Management systems in production engineering, n. 4 (16), pp 184 – 186, 2014.

[22] NOGUEIRA, M.B.M.; SANTOS, L.V.; OLIVEIRA, J.E.F.; GUIMARÃES, P.B. **Desenvolvimento do programa computacional Analysis para detecção de outliers**. Revista Cientec, Vol5, n. 2, pp 40 – 49, Recife, 2013.

[23] ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos da metrologia científica e industrial**. Barueri: São Paulo, Editora Manole, 2008.

[24] ROTONDARO, R. G. **Seis sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços**. São Paulo, 1ª edição, Editora Atlas, 2008.